第十三章　黑洞

13.1 牛頓力學的黑洞觀念

- 逃逸速度 (Escape velocity)是逃離一顆星體的引力需要的最小速度。恆星的表面引力越強，逃逸速度越高 (越難逃離)
- 從牛頓萬有引力定律可知，一顆表面引力強的恆星可能
  - 有很大的質量 (引力與質量成正比)，或
  - 有很小的體積 (引力與距離的平方成反比)
- 如果一顆恆星的質量大但體積小，逃逸速度一定非常高。
- 當恆星的逃逸速度等於光速，即使光亦不能逃離恆星，這樣的天體便是黑洞！當然，這只是利用牛頓力學的推論，牛頓力學並未預言光會受引力影響，所以嚴格來說，這推論是不合法的，但所得出的黑洞半徑卻巧合地與相對論的結果相同。

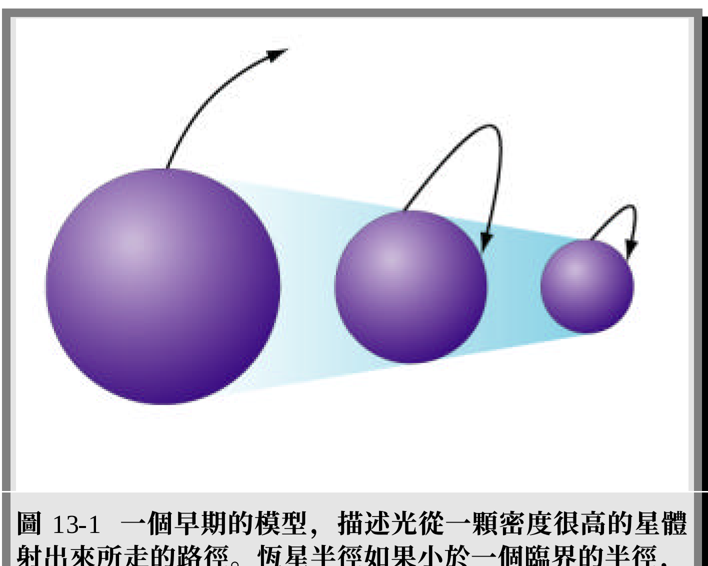


圖 13-1　一個早期的模型，描述光從一顆密度很高的星體射出來所走的路徑。恆星半徑如果小於一個臨界的半徑，那麼從恆星射出來的光粒子 (當時仍未知道光是一種波動) 便會跌回它的表面。

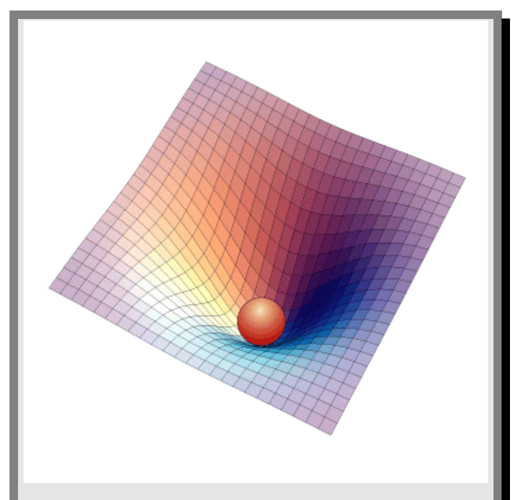


圖 13-2　廣義相對論描述一個大質量物體使時空彎曲，可以被比喻為一個重球使橡皮彎曲。雖然這只是一個比喻，但卻可以幫助我們了解愛因斯坦的理論中一些比較抽象的概念。

13.2 廣義相對論的黑洞觀念

- 質量導致時空扭曲，就好像把一個重球放在橡皮上。
- 廣義相對論預測，光波逃離強大的引力場後能量減低，出現紅移現象，稱為引力紅移 (Gravitational redshift)。
- 如恆星質量不變，則其體積越小，表面引力便越強。因此當恆星收縮時，表面所放的光的引力紅移便相應增大。
- 當天體收縮至所謂臨界半徑 (Critical radius) 時，周圍時空被嚴重扭曲，形成一個「時空的洞穴」光波「爬出這個洞穴」時失去所有能量，引力紅移變得無限大。換言之，光亦不能逃離這個「時空的洞穴」，那個天體便變成了一個黑洞。
- 黑洞的形成
  - 當死亡恆星核心的質量超過約 3 個太陽質量時，星核在引力下不斷收縮，即使中子簡併壓力亦不能對抗引力，密度超越核子物質的密度，最後收縮成密度趨向於無窮大的一點，稱為奇點 (Singularity)
  - 恆星必需收縮至小於其臨界半徑時，方能成為黑洞

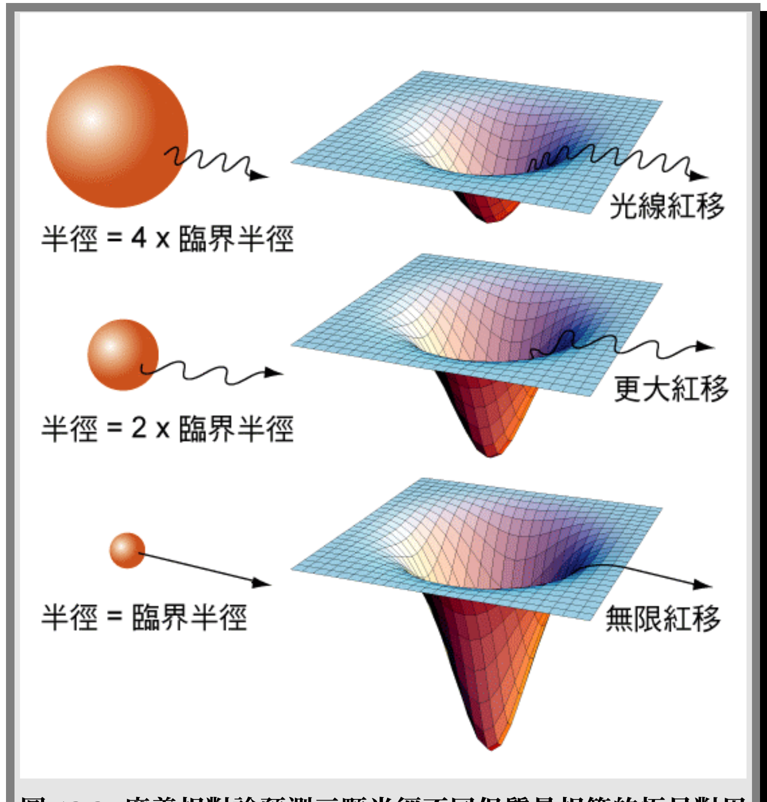


圖 13-3 廣義相對論預測三顆半徑不同但質量相等的恆星對周圍時空所造成的扭曲，以及表面星光的紅移現象。第一顆星的半徑比臨界半徑大四倍，第二顆大兩倍，第三顆的半徑剛好等於臨界半徑。用現代的語言來說，第三顆星的表面已經變成了一個黑洞。

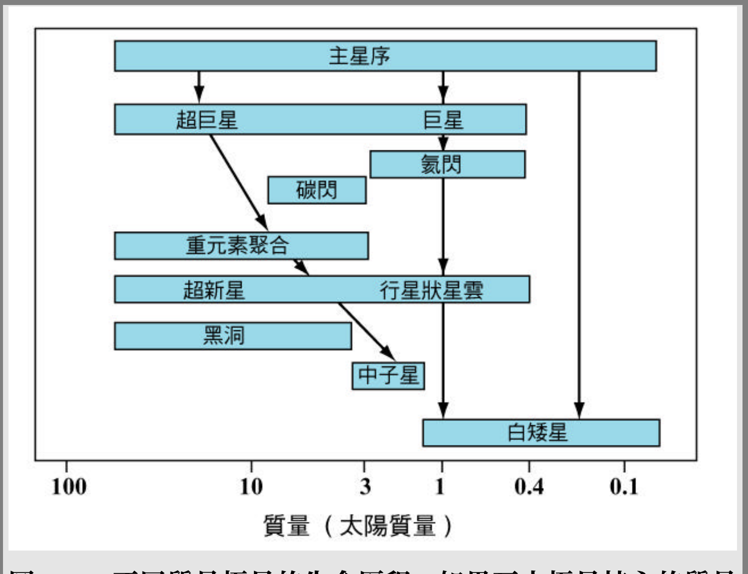


圖 13-4 不同質量恆星的生命歷程。如果死亡恆星核心的質量超過約 3 個太陽質量時，星核最後會收縮成密度趨向於無窮大的一點，變成黑洞。

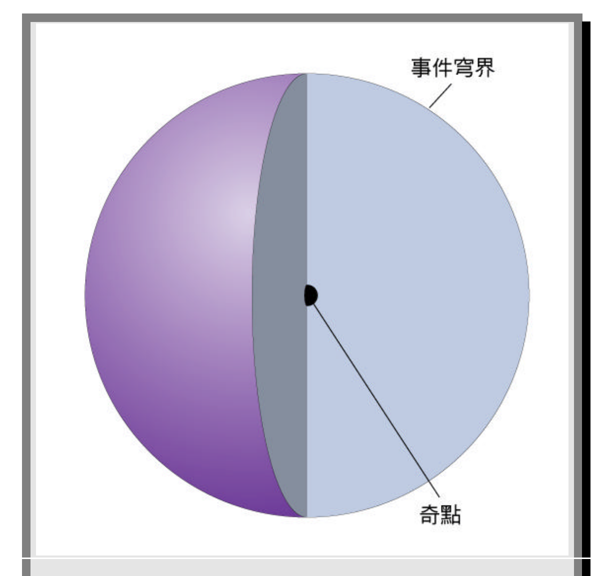


圖 13-5 史瓦西黑洞的結構。它的中心是一個密度接近無限大的物體，稱為奇點，外面被事件穹界包圍著，在事件穹界以內沒有任何東西可以逃脫，連光線也不例外。

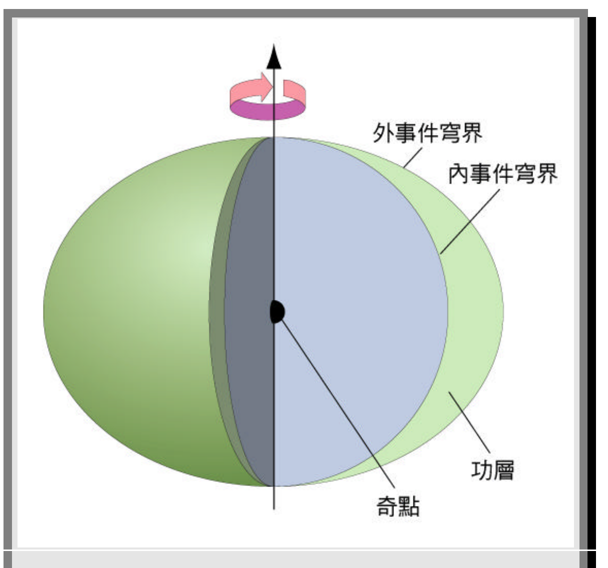


圖 13-6 克爾黑洞的中心是一個旋轉的奇點，被兩重事件穹界包圍著，在外事件穹界以內任何東西都會被旋轉的時空拖曳著，在內事件穹界以內則沒有任何東西可以逃脫。

- **史瓦西黑洞** (Schwarzschild black hole)
  - **不自轉的恆星最後收縮成為史瓦西奇點** (Schwarzschild singularity)
  - **事件穹界 (視界)** (Event horizon) **是圍繞著奇點的一個邊界，所有物體進入這邊界內便永不能逃脫，連光線也不例外**
  - **史瓦西半徑** (Schwarzschild radius) **是史瓦西黑洞事件穹界的半徑，即所謂臨界半徑**
- **克爾黑洞** (Kerr black hole)
  - **描述一個自轉黑洞的廣義相對論方程解**
  - **在外事件穹界** (Outer event horizon) **內所有東西都會被旋轉的時空拖曳著**
  - **在內事件穹界** (Inner event horizon) **內沒有任何東西能夠逃脫**
  - **功層** (Ergosphere) **位於兩事件穹界之間。進入這區域的粒子會被一分為二：一顆墮入黑洞，另一顆則以較高的能量被射出。因此有可能從功層裏提取能量**

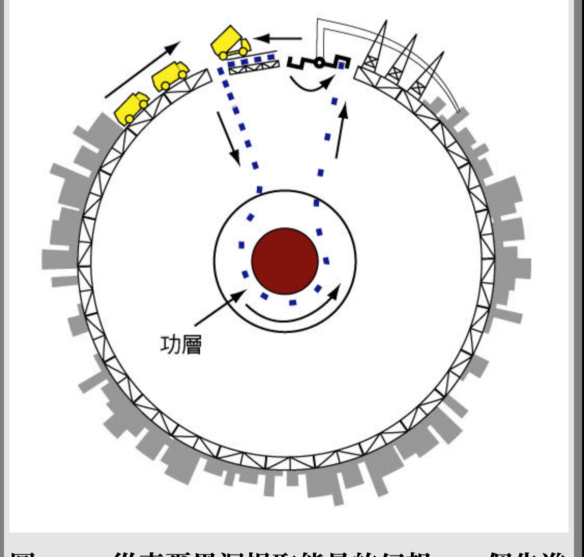


圖 13-7 從克爾黑洞提取能量的幻想。一個先進的文明會把城市建築在一個圍繞著黑洞的堅固結構之上。垃圾處理廠每天把一百萬噸廢物投進黑洞。垃圾在黑洞的功層中旋轉時一分為二，其中一部份以更大的能量射回城市，在這過程中獲得的能量可以用來發電。

13.3 黑洞的奇異現象

- 對於離事件穹界很遠的觀測者來說，黑洞的引力並無特別之處，它的引力等價於一顆相同質量恆星。只要觀測者遠離事件穹界，牛頓定律 (或開普勒定律) 依然適用。
- 遠離黑洞的觀測者看見一艘太空船正在跌進黑洞：
  - 對這個觀測者來說，太空船內的鐘走得較自己的鐘慢，即產生所謂時間膨脹 (time dilation) 現象。當太空船墮進事件穹界時，這種效應變得無窮大，因此太空船會停留在事件穹界之上不動，好象時間凝固了。他永遠看不到太空船跌進事件穹界
  - 這個觀測者亦看見太空船向黑洞下墜時，所放射的光產生引力紅移，離事件穹界越近，紅移程度越大
- 當正跌進黑洞的太空船迫近事件穹界時，裏面的觀測者
  - 將不會體驗到時間膨脹，並很快地越過事件穹界
  - 受著不斷增加的潮汐力，沿著黑洞的方向被拉長，橫向則被壓縮，在未進入事件穹界以前，太空船可能已經被拉碎成一些基本粒子
  - 看見遙遠的星光聚集成一個細小區域
- 事件穹界內時空扭曲得非常複雜。
  - 中心為時空奇點，廣義相對論和量子力學均失效，目前仍沒法了解
  - 最合理的推測是，一切進入黑洞的物體皆被奇點吞沒，黑洞內應該沒有所謂蟲洞 (Wormhole) 可以通往宇宙其他地方或另一個宇宙

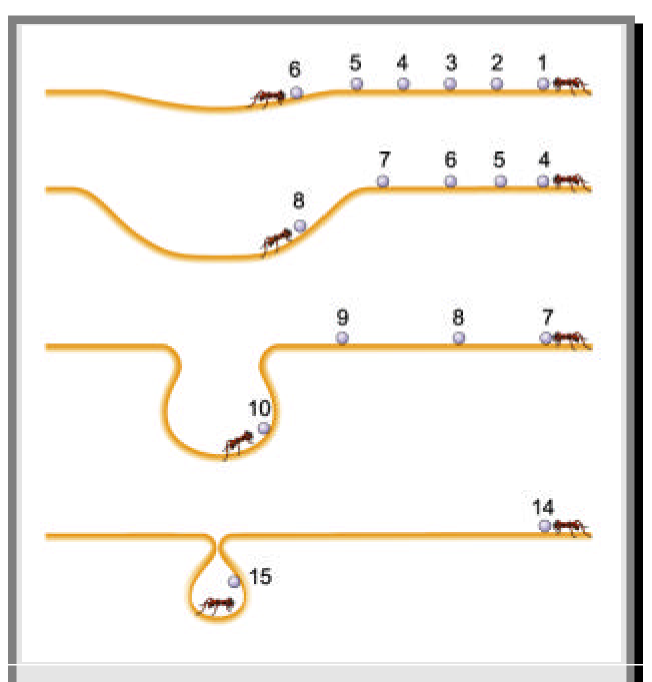


圖 13-8 一個正在收縮成黑洞的恆星可以有趣地比喻為一幅佈滿螞蟻的象皮正在下陷。在彎曲象皮中的螞蟻以均速投射小球 (就像光速不變) 與外面的同伴溝通。當象皮在引力下不斷向內加速彎曲，那些以均等時距投射的小球被外面的螞蟻接收時，球與球之間相隔的時空距離變得越來越遠，就好像引力紅移和時間膨脹的效應一樣。

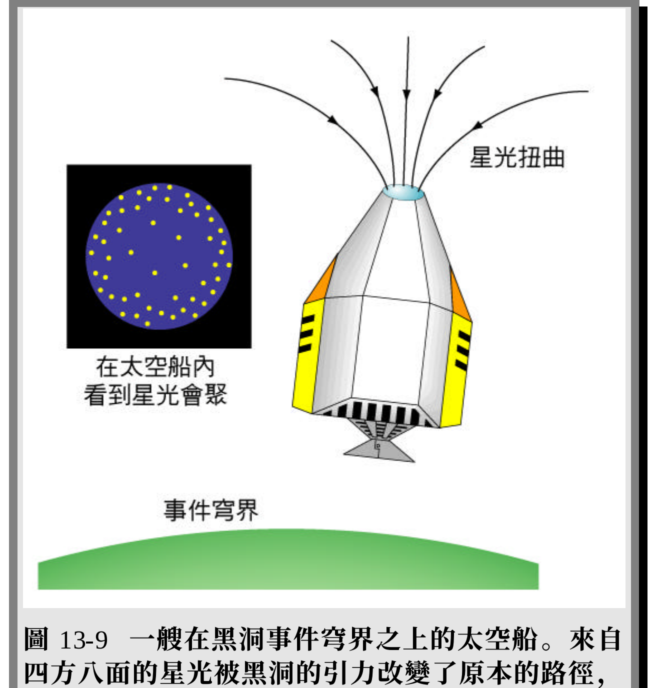


圖 13-9 一艘在黑洞事件穹界之上的太空船。來自四方八面的星光被黑洞的引力改變了原本的路徑，使太空船內的人看見所有星光集中在一個細小的圓形區域之內。

13.4 尋找黑洞

- 遠離事件穹界，牛頓定律仍然適用。如果我們觀測得一堆物質繞著一個不可見的黑暗天體旋轉，只要我們知道那堆物質的運動狀況，便可利用牛頓定律推斷該黑暗天體的質量。
- 如果發現黑暗天體的質量很大，但所處的空間很小，那天體便可能是一個黑洞
- 在一些雙星系統 (Binary system) 中，恆星和一個不可見的黑暗天體互相繞對方旋轉。這個黑暗天體可能是中子星或黑洞。
  - 利用多普勒效應 (Doppler effect) 可量度可見恆星的運動，分析其軌道。如發現恆星正以高速繞黑暗天體運動，便知黑暗天體的質量很大。如果黑暗天體大於 3 個太陽質量，便可能是一個黑洞
  - 黑暗天體可能吸食恆星的物質。當物質跌進黑洞時，吸積盤產生高熱，發出 X 射線
  - 懷疑是黑洞的例子：天鵝座 X-1 是一個 X 射線源，估計黑暗天體的質量約為 16 太陽質量。天鵝座 V404 是一顆發射 X 射線的新星，黑暗天體的質量約為 6.3 太陽質量。
- 在很多星系核心都存在超級黑洞 (Supermassive black hole)，這些黑洞的質量都非常龐大，在數百萬至數十億太陽質量之間，並非由恆星演化而來的。
  - 跌進黑洞的物質形成巨大吸積盤，產生高熱和巨大的能量，解釋活躍星系的高能輻射
  - 高速的氣體垂直於吸積盤向外噴射，成為一些活躍星系中常見的噴流和輻射瓣

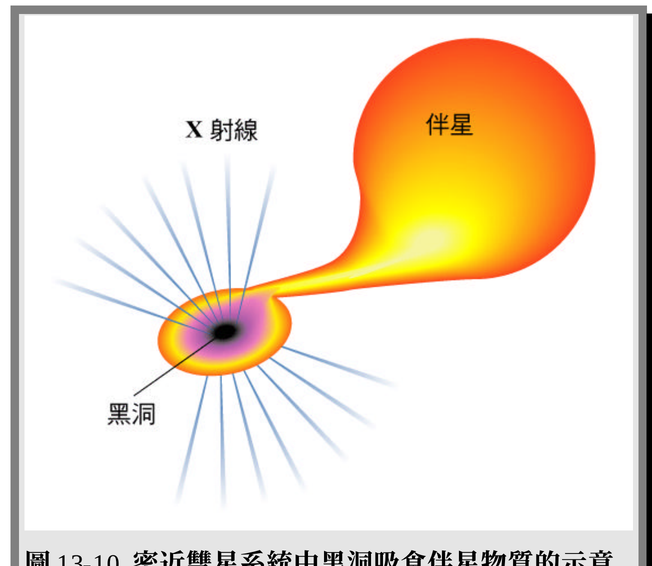


圖 13-10 密近雙星系統中黑洞吸食伴星物質的示意圖。物質在黑洞周圍形成吸積盤，摩擦力使盤內物質的溫度大幅上升，發射 X 射線等高能輻射。

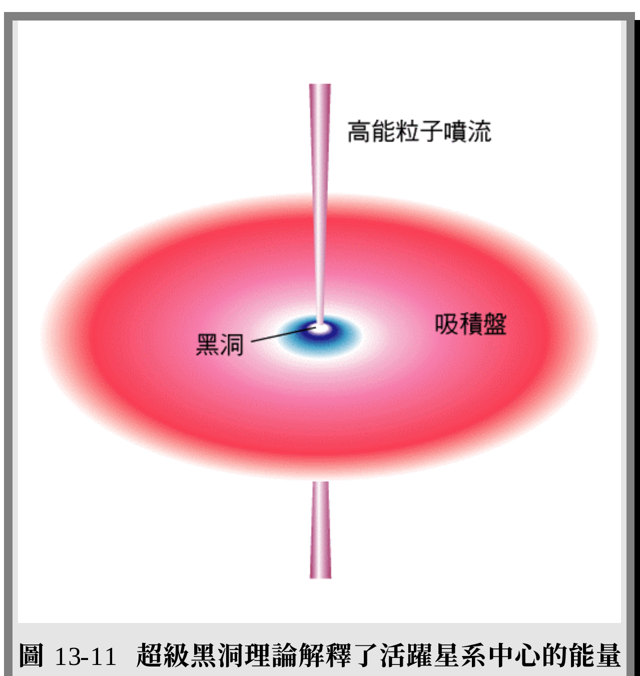


圖 13-11 超級黑洞理論解釋了活躍星系中心的能量來源。物質不斷沿旋轉的路徑被吸積進入黑洞，產生高熱和巨大的能量。受磁場影響的氣體垂直於吸積盤向外以高速噴射，成為一些活躍星系中常見的噴流和輻射瓣。

- **星系核心超級黑洞的例子**
  - **巨型橢圓星系** M87: **在核心兩邊** 0.25 **弧秒的範圍內發現物質正以** 500 km/s **高速旋轉，估計約有** 3×10^{9} (**三十億**) **個太陽的質量處於只有太陽系般大小的範圍內**
  - NGC 4261 **擁有兩片巨大的無線電發射源，在核心附近** 300 **光年的範圍內發現了一個正以高速旋轉的氣體盤，估計核心質量高達** 1.2×10^{9} (**十二億**) **太陽質量**

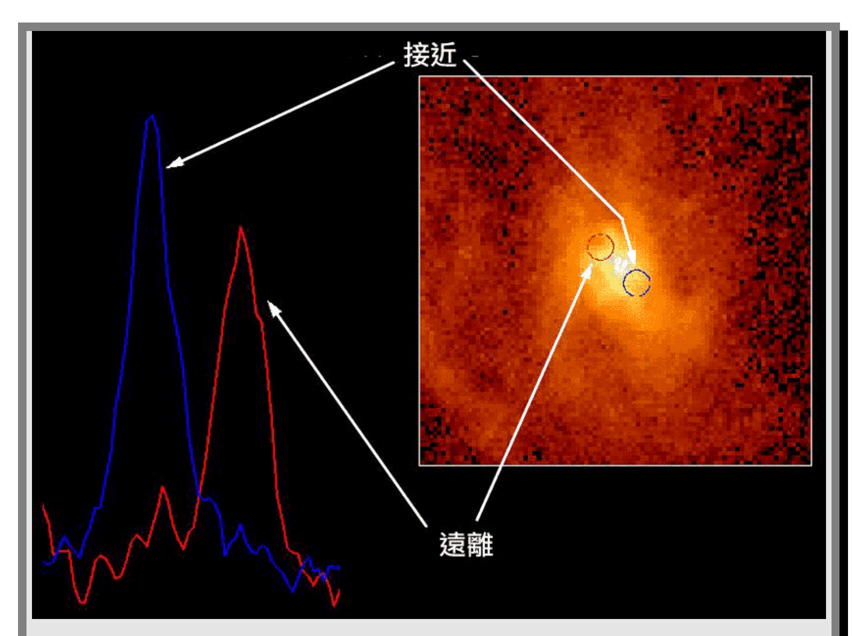


圖 13-12 **哈勃太空望遠鏡攝得巨型橢圓星系**M87**的中心，發現一個繞著中心旋轉的細小氣體盤。紅線和藍線分別代表不同位置的氣體在多譜勒效應下產生紅移和藍移的光譜** (**紅移表示氣體正在遠離我們，藍移表示氣體正向著我們而來**)，**顯示氣體盤正以高速旋轉。**

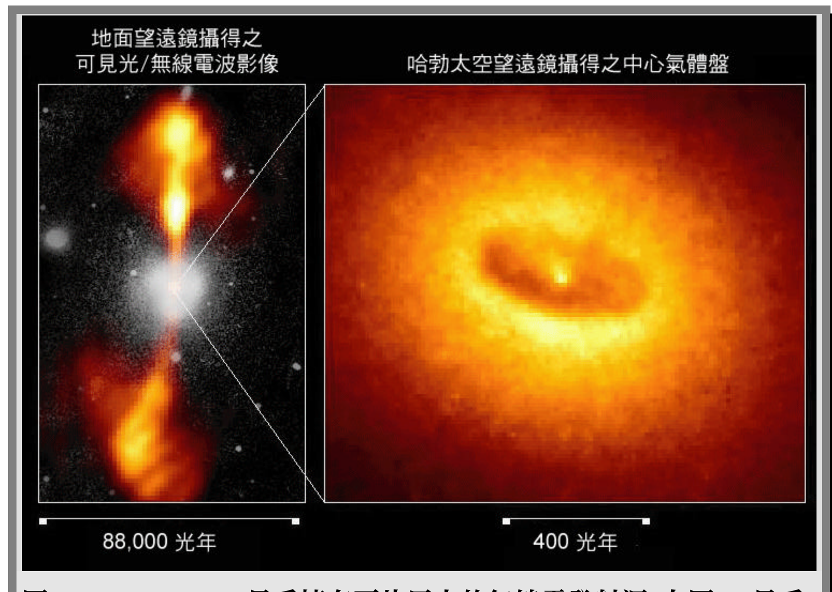


圖 13-13 NGC4261 **星系擁有兩片巨大的無線電發射源** (**左圖**)，**星系中心附近擁有高速旋轉的氣體盤** (**右圖**)。